

เคมีสีเขียว

Green chemistry

ณัฏฐ์คณิน ศุภเมธานนท์, พิมพา สร้อยสูงเนิน, สิริวิทย์ ลิศนันท์, ณัฏฐา พันธมา, ปนัดดา เพชรล้วน,
สุदारัตน์ สมบัติศรี, พิมภิญญา กันทาตง, ชัยยศ จันทรแก้ว และอาทิตย์ อัสวสุชี*

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน จ. นครราชสีมา 30000

*Email: ausavasukhi@gmail.com

บทคัดย่อ

เคมีสีเขียวเป็นปรัชญาของการวิจัยทางเคมีและวิศวกรรมที่สนับสนุนให้เกิดการออกแบบผลิตภัณฑ์และกระบวนการที่ลดการใช้และการสร้างสารที่เป็นอันตรายโดยยึดตามหลัก 12 ข้อของเคมีสีเขียวที่พัฒนาโดยแอนสเทสและวอร์เนอร์ ในบทความนี้จะเน้นรายงานวิจัยเคมีสีเขียวซึ่งประกอบด้วย การเร่งปฏิกิริยาเคมี การดูดซับ พลาสติก เคมีวิเคราะห์ เคมีไฟฟ้า ชีวเคมี และเคมีอินทรีย์ซึ่งเป็นงานวิจัยที่พยายามจะลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยการพัฒนาเทคโนโลยีที่เป็นเนื้อแท้ที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ : เคมีสีเขียว ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หลัก 12 ข้อของเคมีสีเขียว

Abstract

Green chemistry is a philosophy of chemical research and engineering that facilitates the design of products and processes that minimize the use and generation of hazardous substances. This minimization follows 12 principles of green chemistry developed by Anastas and Warner. This article focuses on green chemistry research, including catalysis, adsorption, plastic, analytical chemistry, electrochemistry, bio-chemistry, and organic chemistry, that attempts to reduce the environmental impact by the development of technology that is inherently non-toxic to living things and the environment.

Keywords: Green chemistry: Environmental impact: 12 principles of green chemistry

บทนำ

เนื่องจากปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมส่งผลกระทบต่อรุนแรงกับประชาชนในวงกว้าง ดังนั้นจึงเกิดกระแสการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน และมีแนวโน้มที่จะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ “เคมีสีเขียว (Green chemistry)” เป็นศาสตร์แขนงหนึ่งที่มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากจุดเริ่มต้น โดยมีหลัก 12 ข้อ [1] ดังนี้ (1) ป้องกันการเกิดของเสีย (Prevent waste) (2) ออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ให้สารตั้งต้นถูกนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์มากที่สุด (Atom economy) (3) ออกแบบกระบวนการสังเคราะห์ที่ไม่เป็นอันตรายหรือเป็นพิษน้อยหรือไม่เป็นพิษ (Less hazardous chemical syntheses) (4) ออกแบบ

สารเคมีและผลิตภัณฑ์ที่ไม่เป็นพิษ (Designing safer chemicals and products) (5) ใช้ตัวทำละลายและกระบวนการที่ปลอดภัย (Use safer solvents and reaction conditions) (6) เพิ่มประสิทธิภาพของการใช้พลังงาน (Design for energy efficiency) (7) ใช้สารหรือวัตถุดิบที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Use renewable feedstock) (8) ลดการเกิดสารอนุพันธ์ (Reduce derivatives) (9) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalysts) (10) ออกแบบให้ผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วมีการสลายตัวโดยไม่ก่ออันตราย (Design for degradation) (11) มีการวิเคราะห์อย่างทันทั่วถึงเพื่อป้องกันการเกิดมลภาวะ (Real time analysis for pollution prevention) (12)

ใช้สารเคมีที่ลดอัตราการเกิดอุบัติเหตุ (Inherently safer chemistry for accident prevention)

เคมีพื้นฐานและเคมีประยุกต์แขนงต่างๆ ล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับเคมีสีเขียว ถ้ามีวัตถุประสงค์อันเป็นจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมจากจุดเริ่มต้นโดยคำนึงถึงหลักทั้ง 12 ข้อ ในบทความนี้จะได้นำเสนอตัวอย่างงานวิจัยในเคมีแขนงต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับเคมีสีเขียว

2. เคมีแขนงต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเคมีสีเขียว

2.1 การเร่งปฏิกิริยาสีเขียว

ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) เป็นสารที่ทำหน้าที่เร่งอัตราในการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือเร่งการสลาย-สร้างของพันธะเคมี เพื่อเพิ่มปริมาณและควบคุมให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามที่ต้องการ ลดพลังงานที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยามีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพชีวิต เช่น ใช้ในการบำบัดมลพิษจากสิ่งแวดล้อม ใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ใช้ในการผลิตพลังงานทดแทน เป็นต้น อย่างไรก็ตามตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ส่วนใหญ่มักมีราคาแพง บางชนิดเป็นพิษกับสิ่งแวดล้อม ดังนั้นการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาให้มีประสิทธิภาพ มีความจำเพาะสูง และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมจึงมีความสำคัญ

แร่ดินเหนียว (Clay mineral) เป็นสารประกอบแอนไฮดรัสลูมิโนซิลิเกตส่วนใหญ่มีลักษณะเป็นแผ่นเกิดจากการเรียงซ้อนกันของชั้นซิลิกา และอลูมินา และในระหว่างชั้นจะมีไอออนบวกของโลหะ เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม และเหล็กแทรกอยู่ เกิดจากการผุพังของหิน โดยทั่วไปมีอนุภาคนาขนาดเล็กระดับไมครอน แร่ดินเหนียวถูกนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา หรือใช้เป็นวัสดุรองรับ (Supporting material) ในการเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากมีราคาไม่แพง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังมีสถานะเป็นของแข็งซึ่งมีสถานะแตกต่างจากสารที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา (ตัวเร่งปฏิกิริยาวិวิพันธ์ (Heterogeneous catalyst)) จึงสามารถแยกออกจากระบบได้ง่ายเมื่อสิ้นสุดการเร่งปฏิกิริยา

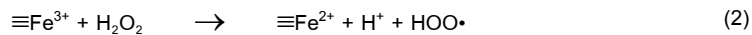
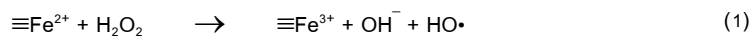
ตัวอย่างการใช้แร่ดินเหนียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาวิวิพันธ์ได้แก่ งานวิจัยของ Alves และคณะ

[2] ซึ่งใช้แร่ดินเหนียวกลุ่มสเมคไทต์ (Smectite) เป็นวัสดุรองรับ โดยเติมแต่งโพแทสเซียมฟลูออไรด์ (KF) เพื่อให้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมได้มีสมบัติเป็นเบสในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification) ในการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจากการศึกษาปริมาณเบส (Basicity) โดยใช้แฮมเมตต์-อินดิเคเตอร์ (Hammett indicator) พบว่าแร่ดินเหนียวมีปริมาณเบส 0.14 มิลลิโมลต่อกรัม ส่วนแร่ดินเหนียวที่ดัดแปรด้วยโพแทสเซียมฟลูออไรด์ (Clay-KF) มีปริมาณเบสเพิ่มขึ้นเป็น 1.02 มิลลิโมลต่อกรัม และปริมาณเบสที่แตกต่างกันนี้จะส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง (% Conversion) กล่าวคือเมื่อใช้แร่ดินเหนียวที่ไม่ได้ดัดแปรจะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงต่ำมีค่า 3.3 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เมื่อใช้ Clay-KF เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเท่ากับ 99.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเร่งปฏิกิริยาภายใต้สภาวะการทดลองดังนี้ ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อัตราส่วนจำนวนโมลของเมทานอลต่อน้ำมัน 6:1 อุณหภูมิในการเร่งปฏิกิริยา 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 1 ชั่วโมง จะเห็นได้ว่าแร่ดินเหนียวสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรองรับเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยการดัดแปรให้มีสมบัติเป็นเบสและสามารถนำมาใช้ในการเร่งปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในการผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันซึ่งไบโอดีเซลเป็นพลังงานทางเลือกที่สำคัญในปัจจุบันที่จะนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากซากฟอสซิล

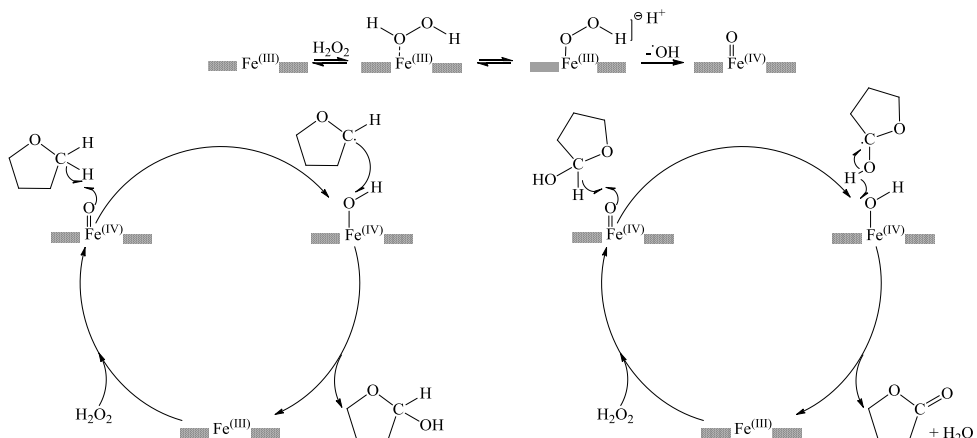
นอกจากนี้ยังสามารถใช้แร่ดินเหนียวเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการบำบัดมลพิษทางสิ่งแวดล้อม เช่น ใช้ในการกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรม โดยใช้การเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดย Hassan และ Hameed [3] ได้เตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาโดยใช้ดินเหนียวชนิดบอลล์เคลย์ (Ball clay) เป็นวัสดุรองรับและเติมเหล็กลงไปเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยาเฟนตันออกซิเดชัน (Fe-BC) เพื่อกำจัดสีย้อมชนิดแอนทราควิโนรีแอคทีฟ บลู 4 (Anthraquinone Reactive Blue 4; RB4) ในสารละลาย แม้ว่าบอลล์เคลย์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีเหล็กเป็นส่วนประกอบ แต่มีในปริมาณที่ไม่เพียงพอจึงทำการเติมไอออนเหล็ก(II) ลงไปซึ่งเหล็กจะเป็นตำแหน่งที่ว่องไวในการเร่งปฏิกิริยาเฟนตัน

ออกซิเดชัน โดยเหล็กจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เกิดอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (HO•) ซึ่ง

เป็นสารออกซิไดซ์ที่แรงซึ่งสามารถใช้ในการกำจัดสารพิษได้ ปฏิกิริยาเกิดขึ้นดังสมการ (1) และ (2)



เมื่อสัญลักษณ์ $\equiv$ เป็นตัวแทนของสปีชีส์เหล็กบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา



รูปที่ 1 การเปลี่ยนเตตระไฮโดรฟูแรนเป็นบิวทิโรแลคโตนโดยใช้เคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบที่ได้รับการปรับสภาพทางความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา [4]

จากการศึกษาพบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการกำจัดสี RB4 คือ การเติมเหล็ก 0.8 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักบนตัวรองรับบอลล์เคลย์ ปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาเท่ากับ 5.0 กรัมต่อลิตร พีเอช 3 ความเข้มข้นเริ่มต้นของไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 8 มิลลิโมลาร์ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ RB4 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะนี้ให้ประสิทธิภาพของการกำจัดสี RB4 ถึง 99 เปอร์เซ็นต์ในเวลา 140 นาที จากงานวิจัยสามารถสรุปได้ว่าแร่ดินเหนียวบอลล์เคลย์สามารถนำมาใช้เป็นวัสดุรองรับเพื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา Fe-BC เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพนตันออกซิเดชันแบบวิวิธพันธุ์สำหรับการกำจัดสีย้อม RB4

ในกรณีของการนำเคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบ มาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาโดยไม่มีการ

เติมแต่งตำแหน่งที่ว่องไวอื่นๆ เพิ่มเติม แต่สามารถปรับปรุงตำแหน่งที่ว่องไวซึ่งเป็นเหล็กที่มีอยู่ในเคลย์ โดยการปรับสภาพด้วยความร้อน (Thermal treatment) ดังตัวอย่างงานวิจัยของ Ausavasukhi และ Sooknoi [4] ซึ่งศึกษาการเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran) ซึ่งเป็นสารอนุพันธ์ชีวมวลให้เปลี่ยนเป็นบิวทิโรแลคโตน (Butyrolactone) (รูปที่ 1) ซึ่งเป็นสารที่ใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์

โดยการปรับสภาพตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิมากกว่าหรือเท่ากับ 500 องศาเซลเซียสจะทำให้เหล็กที่เป็นส่วนประกอบในเคลย์มีความว่องไวต่อการเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น โดยทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ได้เป็นออกซิเจนที่ว่องไวที่พื้นผิว (Active oxidant) โดยที่สภาวะของการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ

66 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง ตัวเร่งปฏิกิริยาเคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบที่ได้รับ การปรับสภาพทางความร้อนที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจำนวน 0.1 กรัม เตตระไฮโดรฟูแรน 0.05 โมล และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.05 โมลจะให้เปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลง 26.91 เปอร์เซ็นต์ โดยมีเปอร์เซ็นต์การเลือกสรร (% Selectivity) ของบิวทิโรแลคโตน 61.87 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่าเคลย์ที่มีเหล็กเป็นส่วนประกอบสามารถนำมาใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเตรียมสารป้อนในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ได้ และสิ่งที่น่าสนใจมากกว่านั้นคือสารตั้งต้นที่ใช้ในการเตรียมสารป้อนสำหรับการผลิตพอลิเมอร์เป็นสารที่เตรียมได้จากชีวมวล

การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นหลักการที่สำคัญของเคมีสีเขียว จากงานวิจัยข้างต้นตัวเร่งปฏิกิริยาที่เลือกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่ได้จากธรรมชาติจึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดวิวิธพันธุ์ทำให้สามารถแยกและนำกลับมาใช้ใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยตัวเร่งปฏิกิริยาไม่ถูกทิ้งไว้ในระบบจึงไม่เกิดของเสีย อีกทั้งการเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพจะช่วยทำให้สารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ที่มากขึ้น และมีความจำเพาะสูงทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้ต่ำ นอกจากนี้ยังสามารถทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำลงทำให้ลดการใช้พลังงาน และสามารถหลีกเลี่ยงสภาวะที่รุนแรงในการทำปฏิกิริยาได้ มากไปกว่านั้นในกรณีของการเร่งปฏิกิริยาการเตรียมบิวทิโรแลคโตนยังใช้ตัวทำละลายที่เป็นน้ำทำให้มีความปลอดภัยสูงกว่าการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์

2.2 การดูดซับสีเขียว

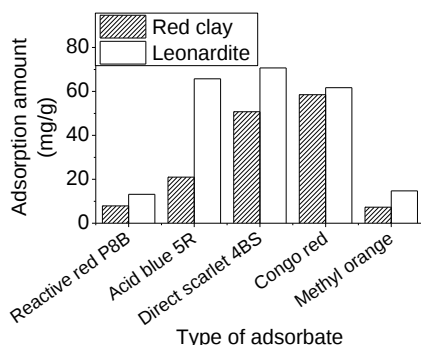
การดูดซับ (Adsorption) เป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้า (Interface) กระบวนการนี้สามารถเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น แก๊สกับของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลที่ถูกดูดซับเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่ดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent)

การนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับเป็นการลดค่าใช้จ่าย และยังเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้ง อีกทั้งเป็นการช่วยจัดการของเสียและของเหลือทิ้งเหล่านี้อีกทางหนึ่งด้วย โดยมีการนำเอาวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นตัวดูดซับมากมาย เช่น ฟางข้าว แกลบข้าว ชังข้าวโพด กะลามะพร้าว ใบชา ชี้อ้อย ชานอ้อย เปลือกถั่วลิสง เปลือกหอมแดง และเปลือกมันสำปะหลัง เป็นต้น ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการใช้วัสดุจากธรรมชาติเพื่อใช้กำจัดมลพิษได้แก่

กนกพร โกษะโยธิน [5] ได้นำชานอ้อยมากำจัดโครเมียม แคดเมียม เงิน โปรท เหล็ก และแมงกานีสจากน้ำเสียที่เกิดในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งชานอ้อยเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่ไม่มีการปรับสภาพทางเคมี และปรับสภาพทางเคมี พบว่าชานอ้อยที่ผ่านการปรับสภาพทางเคมี ขนาด 0.045-1.00 มิลลิเมตร ปริมาณ 25 กรัม/ลิตร ที่พีเอช 9 ระยะเวลาสัมผัส 90 นาที สามารถกำจัดโลหะชนิดอื่นๆ ได้เพียงเล็กน้อย ยกเว้นแมงกานีสและ โปรท สามารถกำจัดได้ 84.24 เปอร์เซ็นต์ และ 95.05 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จะเห็นว่าสามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อกำจัดโลหะหนักได้

นอกจากนี้ อาทิตย์ อัครสุชี และคณะ [6] ได้ศึกษาการนำวัสดุที่มีมูลค่าต่ำจากการทำเหมืองแร่ลิควิดที่อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง ได้แก่ ลิโอนาร์ไดต์ (Leonardite) และดินแดง (Red clay) มาใช้ในการกำจัดสีย้อม รีแอคทีฟ เรด พี8บี (Reactive red P8B), แอซิด บลู 5อาร์ (Acid blue 5R), ไตรเรคตสการ์เล็ต 4บีเอส (Direct scarlet 4BS), คองโก เรด (Congo red), และเมทิลออเรนจ์ (Methyl orange) โดยศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับด้วยถึงปฏิกิริยาแบบกายไตสภาวะการทดลองพีเอช 7 อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 200 มิลลิลิตร เวลาของการดูดซับ 4 ชั่วโมง โดยใช้ตัวดูดซับปริมาณ 0.25 กรัม พบว่าการดูดซับสูงสุดของสีย้อมบนตัวดูดซับลิโอนาร์ไดต์และดินแดงที่คำนวณได้มีค่า 13.2-70.7 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 7.9-58.5 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (รูปที่ 2) จะเห็นว่าสามารถนำวัสดุเหลือ

ทั้งจากการทำเหมืองแร่ลิไนต์มาใช้เป็นตัวดูดซับเพื่อ
กำจัดสีย้อมได้



รูปที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของดิน
แดงและลีโอนาร์ไดต์ [6]

รัสมิ สิทธิชนแก้ว [7] ได้พัฒนาตัวดูดซับเพื่อ
บำบัดแก๊สชนิดต่างๆ อาทิเช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์,
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียม
จากวัสดุจำพวกเปลือกมะพร้าว ต้นสน รัชฎ์พืช
กะลามะพร้าว เป็นต้น พบว่าถ่านกัมมันต์ที่พัฒนาขึ้น
โดยใช้ไอน้ำและสารเคมีที่มีฤทธิ์เป็นด่าง มี
ประสิทธิภาพการดูดซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดี
มากที่สุด อุณหภูมิสูง ปริมาณการดูดซับแก๊ส
ไฮโดรเจนซัลไฟด์อยู่ในช่วง 20-70 มิลลิกรัมต่อกรัม
เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จาก
โรงงานผลิตในเมืองไทยพบว่าถ่านกัมมันต์ที่พัฒนา
โดยการกระตุ้นโดยใช้ไอน้ำมีประสิทธิภาพในการดูด
ซับแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ได้ดีกว่า 50 เท่า นอกจากนี้
เมื่อวัดความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์หลังจาก
ที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ที่พัฒนาขึ้นมาแล้ว
นั้น พบว่าความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีค่า
น้อยกว่า 30 ส่วนในล้านส่วน (ppm) ดังนั้นแก๊ส
เชื้อเพลิงที่ผ่านการบำบัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ด้วย
ถ่านกัมมันต์สามารถนำไปใช้กับเครื่องยนต์
เครื่องจักรกลได้โดยไม่มีการก่อกรรอน

การใช้ตัวดูดซับที่ได้จากธรรมชาติ มีราคาถูก
และสามารถหาได้ง่ายหรือสามารถสร้างทดแทนได้ จะ
ช่วยให้การกำจัดมลพิษด้วยกระบวนการดูดซับมีความ

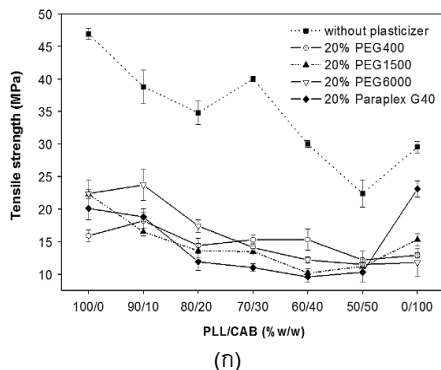
คุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ โดยตัวดูดซับจาก
งานวิจัยนี้เป็นตัวดูดซับที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมเพราะ
เตรียมได้จากวัสดุธรรมชาติมีขั้นตอนการเตรียมที่ไม่
ยุ่งยาก หรือในบางกรณีก็สามารถนำมาใช้เป็นตัวดูด
ซับได้โดยไม่ต้องมีการปรับสภาพ การใช้ตัวดูดซับใน
การกำจัดมลพิษก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมจะช่วยลด
อันตรายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของมลพิษเมื่อ
สัมผัสกับสารเคมีชนิดต่างๆ ที่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมซึ่ง
อาจทำให้มีความเป็นพิษเพิ่มขึ้น จึงมีความจำเป็นที่
จะต้องกำจัดมลพิษตั้งแต่อยู่ในขั้นตอนการผลิต

2.3 พลาสติกสีเขียว

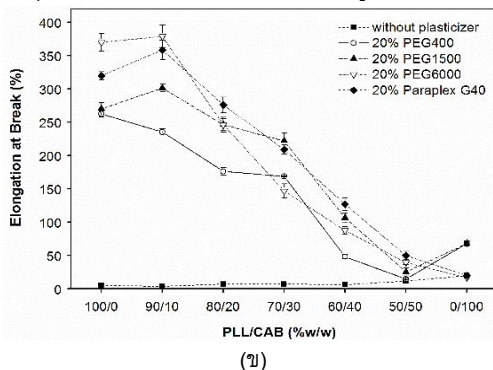
ปัจจุบันพลาสติกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ
(Biodegradable plastics) หรือ พลาสติกชีวภาพ
(Bioplastics) ได้รับความสนใจเป็นอย่างยิ่ง และเป็น
แนวทางหนึ่งในการพัฒนาวัสดุสำหรับการใช้งานเพื่อ
อนุรักษ์สิ่งแวดล้อม กลุ่มอุตสาหกรรมพลาสติกทั่วโลก
ตื่นตัวในการคิดค้นหาวัตถุดิบหรือพอลิเมอร์ชนิดใหม่
เพื่อพัฒนาพลาสติกชีวภาพและให้มีคุณสมบัติในการ
ใช้งานได้ดีเทียบเท่ากับพลาสติกดั้งเดิม (Commodity
plastics) ที่ได้จากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี และสามารถ
ทดแทนการใช้งานที่มีอยู่

พอลิ (แอล-แลคไทด์) (Poly (L-lactide); PLL)
เป็นพอลิเมอร์พื้นฐานที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นบรรจุ
ภัณฑ์ที่ย่อยสลายทางชีวภาพได้มากขึ้น เนื่องจากเป็น
พอลิเมอร์ที่ผลิตจากแหล่งวัตถุดิบในธรรมชาติ เช่น
ข้าวโพด มันสำปะหลัง หรืออ้อย ซึ่งสามารถปลูก
ทดแทนได้และมีสมบัติเชิงกลที่ดี อย่างไรก็ตามพอลิ-
เมอร์นี้มีสมบัติทนต่อความร้อนที่ไม่ดี และมีลักษณะ
ทางกายภาพที่แข็ง เปราะ ทำให้ไม่เหมาะสมสำหรับ
การประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง
ดังนั้นจึงมีงานวิจัยเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติเชิงกล
ของ PLL ตัวอย่างเช่น Kunthadong และคณะ [8] ได้
ศึกษาความเข้ากันได้ และปรับปรุงสมบัติของ PLL
โดยนำมาเบลนด์ (Blend) กับอนุพันธ์ของเซลลูโลส
(Cellulose acetate butyrate; CAB) ซึ่งมีสมบัติที่แข็ง
และเหนียว และพลาสติกไฮดรอกซี (พอลิเอทิลีนไกลคอล
(Polyethylene glycol; PEG) หรือพอลิเอสเทอร์-
อะดิเพต (Polyester adipate; Paraplex G40)) เพื่อ

ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น ในการเตรียม พอลิเมอร์เบลนด์และขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยวิธีหล่อ (Cast-sheet) ในสภาวะสารละลาย จากผลการ วิเคราะห์ด้วยเครื่องดีฟเฟอเรนเชียลสแกนนิ่งแคลอริ- มิเตอร์ (Differential Scanning Calorimeter; DSC) พบว่าทั้ง PEG และ Paraplex G40 สามารถลด อุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้วเป็นคล้ายยาง (Glass transition temperature; T_g) ของพอลิเมอร์ เบลนด์พอลิ (แอล-แลคไทด์)/อนุพันธ์ของเซลลูโลส (PLL/CAB) ทำให้ได้พอลิเมอร์เบลนด์ที่มีความยืดหยุ่น

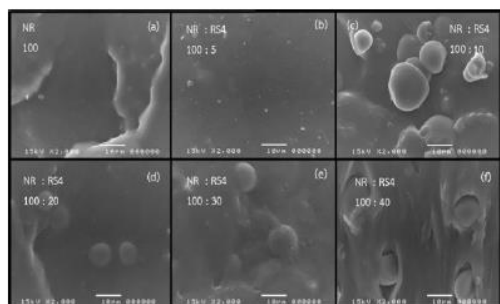


สำหรับ PLL/CAB ที่ใช้ PEG เป็นพลาสติกไซเซอร์นั้นมีความเข้ากันได้บางส่วน เนื่องจากมีการเหนี่ยวนำให้เกิดผลึกใหม่ในพอลิเมอร์ผสมส่งผลให้เกิดการแยกเฟส ในขณะที่เดียวกันจะพบว่าการใช้ Paraplex G40 เป็นพลาสติกไซเซอร์นั้นไม่เสถียรภาพทางลักษณะสัญญาณวิทยาภายใต้ระยะเวลาการเก็บรักษา จากผลการทดสอบด้านสมบัติเชิงกลพบว่าเมื่อผสมพอลิเมอร์ สามองค์ประกอบสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลได้โดย พอลิเมอร์เบลนด์ที่ได้มีความยืดหยุ่นและมีความอ่อนนุ่มเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับ PLL เริ่มต้น (รูปที่ 3)



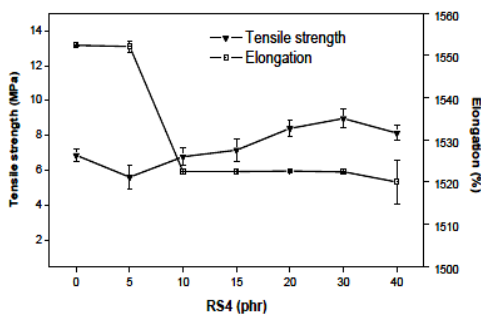
รูปที่ 3 สมบัติเชิงกลของพอลิ (แอล-แลคไทด์) (PLL) อนุพันธ์ของเซลลูโลส (CAB) และพอลิเมอร์เบลนด์พอลิ (แอล-แลคไทด์)/อนุพันธ์ของเซลลูโลส (PLL/CAB) ทั้งที่เติมและไม่เติม 20 เปอร์เซ็นต์พลาสติกไซเซอร์: (ก) ความทนต่อแรงดึงสูงสุด (MPa) และ (ข) เปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาด [8]

เมื่อนำพอลิเมอร์ผสมที่เตรียมได้ไปทดสอบการ ย่อยสลายในสภาวะปุ๋ยหมักแบบใช้อากาศในระยะเวลา 90 วัน พบว่าพอลิเมอร์เบลนด์สามองค์ประกอบมี ความสามารถในการย่อยสลายลดลงเมื่อปริมาณของ อนุพันธ์ของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น จากผลการศึกษา นี้ แสดงให้เห็นว่าปริมาณของอนุพันธ์ของเซลลูโลส และ ชนิดพลาสติกไซเซอร์มีผลต่อความเข้ากันและการย่อย สลายทางชีวภาพ โดยพอลิเมอร์เบลนด์ที่ประกอบด้วย PLL ≥ 70 เปอร์เซ็นต์ CAB ≤ 30 เปอร์เซ็นต์ และ Paraplex G40 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เป็น อัตราส่วนที่พัฒนาความเข้ากันได้ ความสามารถในการ ย่อยสลายทางชีวภาพ และปรับปรุงสมบัติเชิงกล ได้เหมาะสม



รูปที่ 4 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ กวาดของภาคตัดขวางของแผ่น NR/RS4 เบลนด์ที่อัตราส่วนต่าง ๆ กัน : (a) 100:0 (b) 100:5 (c) 100:10 (d) 100:20 (e) 100:30 และ (f) 100:40 [9]

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Sawaddee และคณะ [9] ซึ่งศึกษาความเข้ากันได้และสมบัติของพอลิเมอร์เบลนดระหว่างยางธรรมชาติ (Natural rubber; NR) และแป้งมันสำปะหลังดัดแปรทางเคมีโครสลิงแบบไดสตาซฟอสเฟต (RS4) โดยเตรียมพอลิเมอร์เบลนดด้วยเครื่องบดยางสองลูกกลิ้ง (Two-roll mill) และขึ้นรูปเป็นแผ่นด้วยเครื่องแม่พิมพ์แบบกดอัด (Compression molding) ศึกษาผลของการเติม RS4 ที่ 0-40 ส่วนของเนื้อยางที่มีต่อความเข้ากันได้และศึกษาสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนดระหว่าง NR/RS4 พบว่าเมื่อเติม RS4 ลงใน NR จะช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางความร้อนในพอลิเมอร์เบลนดทุกอัตราส่วน นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์เบลนดที่เติม RS4 ปริมาณ 30 ส่วนใน NR (100/30 phr) อนุภาคของ RS4 จะกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อยางที่เป็นวัฏภาคต่อเนื่อง โดยไม่เกิดช่องว่างระหว่างรอยต่อของวัฏภาค (รูปที่ 4) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าพอลิเมอร์เบลนดนี้มีความเข้ากันได้ดีขึ้นส่งผลในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์เบลนด (รูปที่ 5)



รูปที่ 5 ค่าความทนต่อแรงดึงสูงสุดและเปอร์เซ็นต์ยืด ณ จุดขาดของ NR และ NR/RS4 เบลนดที่อัตราส่วนของ RS4 (phr) แตกต่างกัน [9]

นอกจากนี้ Khongjangreed และคณะ [10] ได้ศึกษาการเตรียมและสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิต (Polymer composite) ในสภาวะสารละลายสามองค์ประกอบระหว่างแป้งมันสำปะหลังดิบ (St) แกลบข้าว (RH) หรือเถ้าแกลบข้าว (RHA) และกลีเซอรอล/ยูเรีย (GU) เตรียมในสภาวะสารละลายโดยใช้น้ำเป็น

ตัวทำละลายและขึ้นรูปเป็นฟิล์มโดยวิธีหล่อ ศึกษาสมบัติของพอลิเมอร์คอมโพสิตของแป้งมันสำปะหลังดิบ และแกลบข้าว (St/RH) และแป้งมันสำปะหลังดิบ และเถ้าแกลบข้าว (St/RHA) ที่อัตราส่วนต่างๆ ทั้งที่ไม่เติม และเติม 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของ GU พบว่าอัตราส่วนพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่าง St $\geq$ 80 เปอร์เซ็นต์ RHA $\leq$ 20 เปอร์เซ็นต์ และ GU เท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่าความทนต่อแรงดึงและเปอร์เซ็นต์การยืด ณ จุดขาดโดยรวมที่ดีที่สุดคือ ประมาณ 12-14 เมกะพาสกาล และ 6-8 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างแป้งมันสำปะหลังดิบ และเถ้าแกลบข้าวที่มีกลีเซอรอล/ยูเรียจำนวน 10 เปอร์เซ็นต์ (St/RHA+10GU) แสดงอุณหภูมิการเกิดเจลที่เกิดขึ้นของแป้งมันสำปะหลังดิบในพอลิเมอร์คอมโพสิตซึ่งบ่งบอกได้ว่าวัสดุมีความต้านทานความชื้นและการบวมน้ำภายใต้สภาวะการนำไปประยุกต์ใช้งานได้ดีสำหรับทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพโดยกระบวนการฝังในดินของพอลิเมอร์คอมโพสิตพบว่าฟิล์มพอลิเมอร์คอมโพสิตระหว่างแป้งมันสำปะหลังดิบ และเถ้าแกลบข้าวที่มีกลีเซอรอล/ยูเรียจำนวน 20 เปอร์เซ็นต์ (St/RHA+20GU) ย่อยสลายอย่างสมบูรณ์ภายในระยะเวลา 20 วัน จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าพอลิเมอร์คอมโพสิตที่อัตราส่วนนี้สามารถพัฒนาสมบัติเชิงกลและการย่อยสลายได้ทางชีวภาพได้

งานวิจัยข้างต้นได้แสดงถึงการพัฒนาพลาสติกชีวภาพที่เตรียมได้จากธรรมชาติและสามารถย่อยสลายเพื่อกลับคืนสู่ธรรมชาติอย่างเป็นมิตร และไม่เหลือความเป็นพิษตกค้างอยู่ให้เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม โดยพลาสติกชีวภาพที่ถูกพัฒนาขึ้นยังคงมีสมบัติที่เหมาะสมกับการใช้งานได้

2.4 เคมีวิเคราะห์สีเขียว

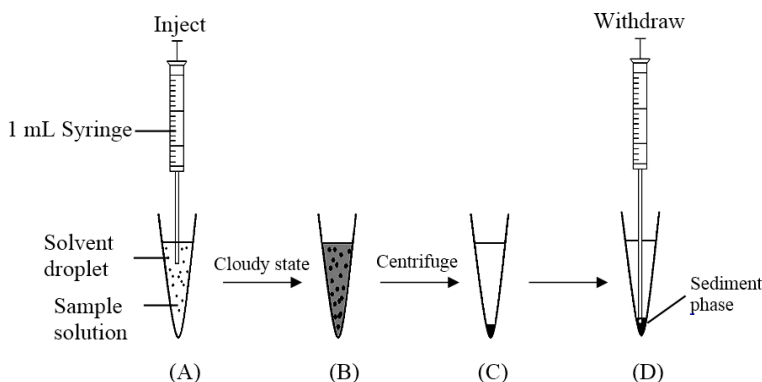
เคมีวิเคราะห์สีเขียวเป็นการใช้เทคนิคและวิธีการทางเคมีวิเคราะห์ซึ่งลดการใช้ตัวทำละลายหรือสารที่เป็นพิษต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม เพื่อลดผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมในวิธีการทางเคมีวิเคราะห์สามารถทำได้ 3 ส่วน คือ (1) การลดปริมาณตัวทำละลายที่ใช้ใน

ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่าง (2) การลดปริมาณการใช้สารที่เป็นพิษในขั้นตอนการตรวจวัด และ (3) การพัฒนาวิธีการทางเคมีวิเคราะห์ที่สามารถตรวจวัดได้โดยตรงโดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายใดๆ

ตัวอย่างงานวิจัยของเคมีวิเคราะห์สีเขียวได้แก่ Arthur และ Pawliszyn [11] ได้เสนอเทคนิคใหม่เรียกว่า การสกัดระดับจุลภาคด้วยเฟสของแข็ง (Solid-phase microextraction; SPME) ซึ่งถือเป็นการเริ่มต้นของการใช้เทคนิคการสกัดระดับจุลภาค (Microextraction techniques) SPME เป็นวิธีเตรียมตัวอย่างสีเขียวที่สำคัญวิธีหนึ่งโดยอาศัยการดูดซับของสารที่สนใจบนตัวดูดซับที่เคลือบบนไฟเบอร์ แต่ก็ยังมีข้อเสียคือไฟเบอร์มีราคาค่อนข้างสูงและหักง่าย การสกัดระดับจุลภาคด้วยเฟสของเหลว (Liquid-phase microextraction; LPME) [12] เป็นเทคนิคที่ต้องการใช้ตัวทำละลายในการสกัดในระดับไมโครลิตร ซึ่งมี

วิธีการสองแบบคือ การสกัดระดับจุลภาคแบบหยดเดียว (Single-drop microextraction; SDME) และการสกัดระดับจุลภาคโดยอาศัยการกระจายตัวของของเหลว (Dispersive liquid-liquid microextraction; DLLME) เทคนิค SDME ใช้ตัวทำละลายในการสกัดน้อย แต่มีข้อเสียคือผู้ใช้ต้องมีความชำนาญในการทำให้หยดของตัวทำละลายเกาะอยู่กับปลายเข็มระหว่างการสกัด และหยดของสารที่ใช้ในการสกัดไม่เสถียร

Rezaee และคณะ [13] ได้พัฒนาการสกัดระดับจุลภาคด้วยเฟสของเหลวแบบใหม่คือ การสกัดระดับจุลภาคโดยอาศัยการกระจายตัวของของเหลว (DLLME) วิธีนี้เป็นการสกัดระบบตัวทำละลาย 3 องค์ประกอบ ได้แก่ ตัวทำละลายสกัด (Extraction solvent) ตัวทำละลายช่วยกระจายตัว (Disperser solvent) และสารตัวอย่างที่เป็นน้ำ (Aqueous sample) ขั้นตอนการสกัดแสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการสกัดระดับจุลภาคโดยอาศัยการกระจายตัวของของเหลว [13]

เทคนิคนี้เมื่อทำการฉีดตัวทำละลายสกัดผสมกับตัวทำละลายช่วยกระจายตัวลงในสารตัวอย่างน้ำอย่างรวดเร็ว จะเกิดการกระจายตัวของตัวทำละลายสกัดเป็นหยดเล็กๆ ในสารตัวอย่างที่เป็นน้ำ ทำให้เกิดสารละลายขุ่น (Cloudy state) แล้วทำการแยกตัวทำละลายสกัดออกจากปั่นเหวี่ยง (Centrifuge) แล้วจึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคทางโครมาโทกราฟีต่อไป ข้อดีของเทคนิคการสกัดระดับจุลภาคโดยอาศัยการกระจายตัวของของเหลว คือ ทำได้ง่าย รวดเร็ว เพิ่มความเข้มข้นได้สูง และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

Soisungnoen และคณะ [14] ได้ประยุกต์ใช้เทคนิคการสกัดระดับจุลภาคโดยอาศัยการกระจายตัวของของเหลวเพื่อสกัดและเพิ่มความเข้มข้นสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสฟอรัส (Organophosphorus pesticides; OPPs) 5 ชนิด คือ พาราไรออน มาลาไรออน ไคอะซินอน อะซินฟอส และ เฟนิโตรไรออน ก่อนจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไมเซลล์อิเล็กโตรไครมาโทกราฟี (Micellar electrokinetic chromatography; MEKC) โดยศึกษาและปรับสภาวะของปัจจัยที่มีผลต่อวิธีการทั้งหมดให้เหมาะสม

ตัวอย่างเช่น ชนิดและปริมาณของตัวทำละลายสกัด และตัวทำละลายช่วยกระจายตัว ผลของการเติมเกลือ เป็นต้น สภาวะที่เหมาะสมในการสกัดด้วยเทคนิคการสกัดระดับจุลภาคโดยอาศัยการกระจายตัวของเหลว คือการใช้ตัวทำละลายสกัดเป็นไดคลอโรมีเทน ปริมาตร 300 ไมโครลิตร ตัวทำละลายช่วยกระจายตัวเป็นอะซิโตนไทรล์ 2 มิลลิตร และเติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยมวล เพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัด ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมพบว่าการใช้สารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสฟอรัสทั้งห้าชนิดโดยพร้อมกันได้ในเวลา 12 นาที ด้วยค่าการเพิ่มขึ้นสูงในช่วง 477 ถึง 635 เท่า ค่าความเป็นเส้นตรงสำหรับพาราไรออน อะซินฟอส และ เฟนิโตรไรออน อยู่ในช่วง 20-1000 นาโนกรัมต่อมิลลิกรัม สำหรับมาลาไรออนและไดอะซินอน อยู่ในช่วง 50-1000 นาโนกรัมต่อมิลลิกรัม ค่าขีดจำกัดต่ำสุดการตรวจวัดอยู่ในช่วง 3-15 นาโนกรัมต่อมิลลิกรัม และค่าเปอร์เซ็นต์การกลับคืนของสารกำจัดแมลงกลุ่มออร์แกโนฟอสฟอรัสทั้งห้าชนิดในตัวอย่างน้ำ คือ 69.5-103 เปอร์เซ็นต์ วิธีที่เสนอนี้ทำให้ได้ค่าการเพิ่มขึ้นที่สูง ความเที่ยงและความแม่นยำดี เวลาในการวิเคราะห์สั้นและใช้ตัวทำละลายอินทรีย์น้อย ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ตัวอย่างงานวิจัยของเคมีวิเคราะห์สีเขียวที่มีการใช้สารอื่นทดแทนตัวทำละลายและรีเอเจนต์ที่มีอันตรายได้แก่ งานวิจัยของ Ordoñez และคณะ [15] ที่วิเคราะห์สารให้ความหวานของเครื่องดื่มโดยใช้น้ำและเอทานอลความเข้มข้นต่ำซึ่งเป็นตัวทำละลายอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษน้อยเป็นเฟสเคลื่อนที่ในการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวความร้อนสูง (High temperature liquid chromatography) ที่ต่อกับแมสสเปกโตรเมตรี (Mass spectrometry) ใช้เวลาในการวิเคราะห์ 23 นาที และมีการใช้ตัวทำละลายเอทานอลเพียง 0.85 มิลลิกรัม โดยมีขีดจำกัดต่ำสุดการตรวจวัดในช่วง 0.05-10 มิลลิกรัมต่อลิตร เปอร์เซ็นต์การกลับคืน 86-110 เปอร์เซ็นต์ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์

ในขณะที่งานวิจัยที่พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ที่สามารถตรวจวัดโดยไม่ต้องใช้ตัวทำละลายได้แก่

งานวิจัยของ Langlois และคณะ [16] ซึ่งพัฒนาวิธีวิเคราะห์พาราเซตามอลในของเหลวในเซลล์เพาะเลี้ยง (Cell culture fluid) จากแบบจำลองตัวกรองกั้นระหว่างเลือดและสมอง (Blood Brain Barrier model) โดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูงแบบกลับเฟส (Reversed phase-High performance liquid chromatography) โดยมีตัวตรวจวัดเป็นไดโอดอาร์เรย์ (Diode array) และการเตรียมสารตัวอย่างได้รับการพัฒนาโดยใช้น้ำเท่านั้น โดยใช้คอลัมน์เป็น XTerra RP18 ขนาด 150 x 4.6 มิลลิเมตร ขนาดอนุภาค 3.5 ไมโครเมตร พร้อมการคัดคอลัมน์ XTerra RP18 ขนาด 20 x 4.6 มิลลิเมตร ขนาดอนุภาค 3.5 ไมโครเมตร วิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และเฟสเคลื่อนที่ประกอบด้วยบัฟเฟอร์ของฟอรัมเมต 100 เปอร์เซ็นต์ ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ พีเอช 4 และอัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ที่ความยาวคลื่น 242 นาโนเมตร โดยมีการตรวจสอบความถูกต้อง และมีขีดจำกัดของการยอมรับ (Acceptance limit) ที่ ± 10 เปอร์เซ็นต์ในช่วงของความเข้มข้น 1-58 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.5 เคมีไฟฟ้าสีเขียว

เคมีไฟฟ้าเป็นศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสของขั้วไฟฟ้า (Electrode) ซึ่งอาจเป็นโลหะหรือสารกึ่งตัวนำในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) โดยปฏิกิริยาเคมีอาจเกิดขึ้นจากแรงดันไฟฟ้าภายนอก หรืออาจเกิดขึ้นแล้วให้แรงดันไฟฟ้าออกมาทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนผ่านปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) และรีดักชัน (Reduction)

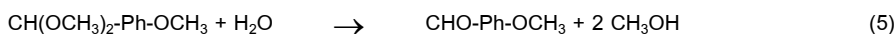
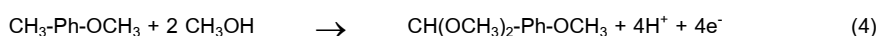
ตัวอย่างงานวิจัยของเคมีไฟฟ้าสีเขียวได้แก่ การเตรียมเมทานอล [17] โดยใช้สารตั้งต้นเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะใกล้จุดวิกฤตทำปฏิกิริยารีดักชันโดยผ่านศักย์ไฟฟ้าเข้าไปที่ขั้วไฟฟ้าทองแดง โดยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์นี้ทำหน้าที่เป็นทั้งสารตั้งต้นโดยเกิดปฏิกิริยารีดักชันและทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายในเวลาเดียวกัน ดังสมการที่ (3)



การผลิตเมทานอลดำเนินการที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส โดยใช้คาร์บอนไดออกไซด์ความดัน 68 บาร์ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่ประหยัดค่าใช้จ่ายเนื่องจากสารตั้งต้นคาร์บอนไดออกไซด์มีราคาถูก และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่มีสารเคมีอันตรายตัวอื่นๆ มาเกี่ยวข้อง

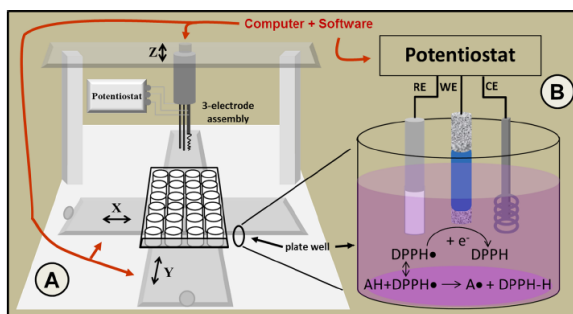
นอกจากนั้นบริษัท BASF [18] ได้คิดค้นวิธีการเตรียมสารประกอบ พารา-เมทอกซีเบนซัลดีไฮด์ (*p*-methoxybenzaldehyde) ด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า โดยวิธีการเตรียมแบบดั้งเดิมจะใช้แก๊สคลอรีนไป

ทำปฏิกิริยาการแทนที่กับ พารา-เมทอกซีโทลูอิน (*p*-methoxytoluene) ซึ่งจะได้กรดไฮโดรคลอริกเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทำให้ต้องเพิ่มกระบวนการแยกแอลดีไฮด์ที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการออกมา แต่ในกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า เริ่มจากการทำปฏิกิริยาออกซิเดชันของพารา-เมทอกซีโทลูอิน โดยมีเมทานอลทำหน้าที่เป็นทั้งสารตั้งต้นและตัวทำละลาย โดยเมทานอลสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ในปฏิกิริยาได้ ดังสมการที่ (4)-(5)



วิธีการนี้มีข้อดีกว่าการเตรียมสารแอลดีไฮด์แบบดั้งเดิมคือไม่เกิดผลิตภัณฑ์พลอยได้เป็นไฮโดรคลอริก

มีการเลือกสรรของปฏิกิริยา และการเกิดปฏิกิริยาขึ้นกับชนิดของขั้วไฟฟ้าที่ใช้



รูปที่ 7 แผนภาพการทำงานเบื้องต้นของเครื่องเคมีไฟฟ้าอัตโนมัติ ภาพ A แกน x, y เป็นตัวเคลื่อนที่ไมโคร-ไทดอเตอร์เพลท ขนาด 24 หลุม และมีแกน z เป็นตัวเคลื่อนที่ขั้วไฟฟ้าในลักษณะขึ้นลง ภาพ B เป็น การเกิดปฏิกิริยาให้และรับอิเล็กตรอนของ DPPH กับสารต้านอนุมูลอิสระ (AH) [19]

Intarakamhang และ Schulte [19] ได้ทำการพัฒนาการวิเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธีทำปฏิกิริยากับ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยใช้วิธีเคมีไฟฟ้าแบบอัตโนมัติดังรูปที่ 7 วิธีนี้มีจุดเด่นในด้านเคมีสีเขียว คือ (1) ขั้วไฟฟ้าที่ใช้คือสแตนเลสซึ่งเป็นคาร์บอนโดยไม่ผ่านการปรับปรุงซึ่งทำให้ประหยัดสารเคมีและเวลาในการเตรียมขั้วไฟฟ้า (2) สารละลายที่ใช้ในการวิเคราะห์บรรจุอยู่ในไมโครไทดอเตอร์เพลท ขนาด 24

หลุม ขนาดหลุมละ 2 มิลลิเมตร ซึ่งใช้ปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับการวัดแบบดั้งเดิมในบีกเกอร์ หรือในภาชนะใส่สารด้านเคมีไฟฟ้า (Electrochemical cell) และ (3) ประหยัดเวลาโดยสามารถวิเคราะห์สารแบบอัตโนมัติได้ 20 ครั้ง (หลุม) ในเวลา 1 ชั่วโมง

2.6 ชีวเคมีสีเขียว

พลังงานมีความสำคัญอย่างมากต่อระบบเศรษฐกิจและการดำเนินชีวิตของประชากรโลก โดยแหล่งพลังงานหลักของโลกได้แก่น้ำมันดิบซึ่งเป็น

เชื้อเพลิงฟอสซิลกำลังจะหมดไป ในขณะที่ความต้องการใช้พลังงานยังคงเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เอทานอลเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจ เนื่องจากสามารถผลิตเอทานอลได้จากวัตถุดิบที่หาได้ง่ายประเภทน้ำตาลและแป้งที่ได้จากพืช อย่างไรก็ตามการผลิตผลทางการเกษตรส่วนหนึ่งซึ่งใช้ในการผลิตเอทานอลถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นอาหารคน และอาหารสัตว์ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตเอทานอลมีราคาสูง นอกจากนี้ถ้าหากต้องการใช้ผลิตผลทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลจำเป็นต้องใช้พื้นที่ในการเพาะปลูกจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้นักวิจัยจึงสนใจค้นหาแหล่งวัตถุดิบใหม่สำหรับการผลิตเอทานอลโดยคำนึงถึงวัสดุที่หาได้ง่าย มีปริมาณมาก สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือทิ้งและนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ รวมทั้งลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย วัตถุดิบดังกล่าว คือ ลิกโนเซลลูโลส โดยลิกโนเซลลูโลส เป็นชีวมวลที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตร วัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น ฟางข้าว เปลือกข้าวโพด ชังข้าวโพด ชานอ้อย เศษไม้ เป็นต้น วัตถุดิบดังกล่าวมีองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสำคัญประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเป็นจำนวนมากสามารถนำมาหมักด้วยจุลินทรีย์เพื่อผลิตเอทานอลได้

การผลิตเอทานอลจากวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสนั้น ประกอบด้วยกระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment) การย่อยสลาย (Hydrolysis) และกระบวนการหมัก (Fermentation) กระบวนการปรับสภาพวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นกระบวนการที่สำคัญมากเนื่องจากลิกโนเซลลูโลสมีโครงสร้างที่ซับซ้อนยังไม่เหมาะกับการย่อยสลายเพื่อให้ได้น้ำตาล วัสดุจึงต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกลิกนิน และเฮมิเซลลูโลส เพิ่มพื้นที่ในการย่อยสลาย ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส เพื่อให้โครงสร้างของเซลลูโลสเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายต่อไป กระบวนการปรับสภาพมีหลายวิธี เช่น การปรับสภาพทางกายภาพ เคมี แต่ทั้งสองวิธีนี้ต้องใช้วัสดุอุปกรณ์ที่ทนอุณหภูมิและทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี อุปกรณ์ที่ใช้จึงมีราคาแพง

นอกจากนี้ต้องใช้พลังงานขณะปรับสภาพโครงสร้างของลิกโนเซลลูโลสอีกด้วย ส่วนการปรับสภาพทางชีวภาพนั้นใช้เอนไซม์จากจุลินทรีย์ย่อยสลายวัสดุอย่างจำเพาะเจาะจง ไม่ใช้สารเคมีรุนแรงจึงไม่ต้องการกำจัดสารพิษที่จะส่งผลเสียต่อกระบวนการต่อไป ลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพแล้วจะถูกนำมาผ่านกระบวนการย่อยสลาย โดยเซลลูโลสจะถูกย่อยเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์คือน้ำตาลกลูโคสจำนวนมาก และการย่อยเฮมิเซลลูโลสจะได้น้ำตาลคาร์บอน 5 และ 6 อะตอม ได้แก่ไซโลส (Xylose) อะราบินอส (Arabinose) แมนโนส (Mannose) แรรมโนส (Rhamnose) และกลูโคส (Glucose) ซึ่งน้ำตาลเหล่านี้จะต้องผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายคือเอทานอลและนำไปกลั่นให้บริสุทธิ์เพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือกใหม่ต่อไป

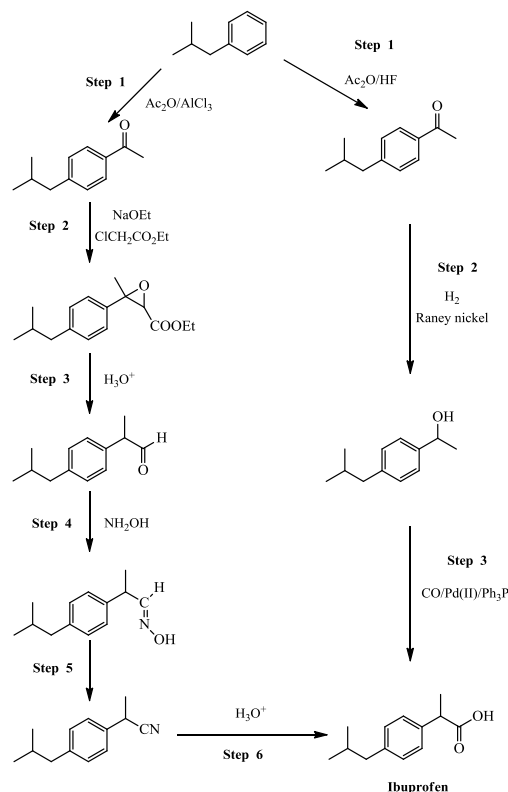
ตัวอย่างงานวิจัยสำหรับกระบวนการผลิตเอทานอลจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส เช่น ฟางข้าวโดยการปรับสภาพฟางข้าวด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.5 เปอร์เซ็นต์ และย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดส ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ค่าพีเอช 5.0 ได้น้ำตาลสูงสุด 0.72 กรัมต่อกรัมเซลลูเลส จากนั้นหมักด้วยเชื้อรา *M. indicus* ได้ผลผลิตเอทานอล 0.1 กรัมต่อกรัมฟางข้าว [20] ส่วนการผลิตเอทานอลจากต้นฝ้ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพโดยการปรับสภาพแบบแห้งด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* เพื่อกำจัดลิกนิน กระบวนการนี้สามารถย่อยลิกนินได้ 35.5 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นผ่านการย่อยสลายด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเอนไซม์เบต้ากลูโคซิเดส พบน้ำตาลไซโลสถึงหนึ่งในสามของปริมาณน้ำตาลทั้งหมด ต่อมาเข้าสู่กระบวนการหมักด้วยยีสต์ *S. cerevisiae* ATCC 24859 ได้ผลิตภัณฑ์คือเอทานอล 0.027 กรัมต่อกรัมต้นฝ้าย พบว่ายังมีปริมาณน้อย เนื่องจากยีสต์ชนิดนี้ไม่สามารถหมักน้ำตาลคาร์บอน 5 อะตอมได้ การศึกษาครั้งนี้พบว่าการปรับสภาพด้วยเชื้อรา *P. chrysosporium* สามารถย่อยลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ แต่อย่างไรก็ตามการปรับสภาพด้วยเชื้อรายังไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายเซลลูโลส [21]

2.7 เคมีอินทรีย์สีเขียว

เคมีอินทรีย์สีเขียว คือการเปลี่ยนวิธีการสังเคราะห์สารให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม โดยลดขั้นตอนในการสังเคราะห์ให้น้อยลง ลดพลังงาน หลักเลี่ยงการใช้สารเคมีที่เป็นพิษหรือเลือกใช้สารเคมีที่มีพิษน้อยลง ได้สารผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่สามารถย่อยสลายได้และลดปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้จะเป็นการพัฒนาวิธีสังเคราะห์สารที่เป็นมิตรกับธรรมชาติอย่างยั่งยืน

ตัวอย่างการสังเคราะห์สารอินทรีย์สีเขียว ได้แก่ การสังเคราะห์ยา Ibuprofen ซึ่งเป็นยาแก้ปวดชนิดที่ไม่เป็นสารสเตอรอยด์และขายดีในปัจจุบัน การสังเคราะห์ Ibuprofen เริ่มต้นครั้งแรกในปี 1960 โดย

บริษัท Boots ประเทศอังกฤษ การสังเคราะห์มี 6 ขั้นตอนด้วยกันซึ่งใช้สารเคมีและพลังงานจำนวนมาก แต่ได้สารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการน้อยโดยมีสารผลิตภัณฑ์ข้างเคียงและของเสียปริมาณมาก ต่อมาในปี 1990 บริษัท BHC ซึ่งได้ทำการวิจัยและได้ค้นพบวิธีใหม่ในการสังเคราะห์ Ibuprofen ซึ่งมีเพียง 3 ขั้นตอนและมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการเดิม สารตั้งต้นถูกเปลี่ยนเป็นสารผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้มากกว่าและของเสียน้อยกว่า ซึ่งทั้ง 2 วิธีการเริ่มต้นจาก 2-methylpropylbenzene ซึ่งได้มาจากอุตสาหกรรมปิโตรเคมี สิ่งสำคัญคือการค้นพบตัวเร่งปฏิกิริยาใหม่ในขั้นตอนที่สองที่ชื่อว่า Raney nickel ซึ่งช่วยลดขั้นตอนการสังเคราะห์ให้น้อยลงกว่าเดิม ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 การสังเคราะห์ Ibuprofen ด้วยวิธีเก่า (ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน) และวิธีใหม่ (ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน)

ในการสังเคราะห์แบบเก่าแต่ละขั้นจะต้องได้ผลผลิต 90 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้จะได้สารผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีปริมาณ 40 เปอร์เซ็นต์จากสารตั้งต้น ซึ่งการสังเคราะห์ด้วยวิธีนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงและของเสียที่ไม่ต้องการเพิ่มตามไปด้วย พลังงานถูกใช้อย่างมากในกระบวนการผลิตที่ไม่มีประสิทธิภาพนี้ ในวิธีเคมีสีเขียวการสังเคราะห์ Ibuprofen ใช้เพียง 3 ขั้นตอน ผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่ได้คือ 77 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ตัวเร่งปฏิกิริยา Raney Nickel สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ในการผลิตวิธีเก่า $AlCl_3$ ถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งต้องถูกทิ้งเป็นของเสียอันตรายและพลังงานที่ใช้ในวิธีที่ 2 ก็น้อยกว่ามาก [22-23] วิธีการสังเคราะห์ Ibuprofen ด้วยวิธีใหม่เป็นตัวอย่างที่ดีของเคมีสีเขียวกล่าวคือมีอิทธิพลต่อการปรับปรุงการผลิตทางอุตสาหกรรมไม่เพียงแต่ประหยัดในแง่เศรษฐศาสตร์ แต่ยังเป็นการใช้วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นอีกด้วย

นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ศึกษากระบวนการสกัดโดยอาศัยของไหลเหนือวิกฤต (Supercritical fluid extraction) ซึ่งกำลังเป็นกระบวนการที่ได้รับความนิยมในการสกัดสารจากพืชสมุนไพร เนื่องจากสามารถลดปริมาณการใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ ซึ่งช่วยลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม

ตัวอย่างงานวิจัย ได้แก่ การศึกษาการเปรียบเทียบการสกัดโดยอาศัยของไหลเหนือวิกฤตกับการสกัดโดยวิธีอื่นๆ โดย Stashenko และคณะ [24] ศึกษาการสกัดสารจากผลของ *Colombian Xylopia aromatica* (Lamarck) และ Grigonis และคณะ [25] ศึกษาการสกัดที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากใบของ *Hierochloa odorata* ซึ่งพบว่าการสกัดโดยอาศัยของไหลเหนือวิกฤตสามารถสกัดสารที่ต้องการได้อย่างมีประสิทธิภาพ และได้ปริมาณสารสกัดแต่ละส่วนประกอบในปริมาณสูง โดยมีความแปรปรวนของแต่ละส่วนประกอบน้อยกว่าวิธีการอื่นๆ

เทคนิคการสกัดสารด้วยของไหลเหนือวิกฤตมีข้อดีหลายประการ เช่น สามารถเลือกสกัดเฉพาะสารสำคัญที่ต้องการได้โดยวิธีการปรับสภาวะในการสกัดให้เหมาะสม จึงทำให้ได้สารที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า

ไม่มีสารเคมีตกค้าง ทำให้เหมาะสมต่อการสกัดสารเพื่อใช้เป็นอาหาร ยา และเครื่องสำอาง

บทสรุป

เคมีสีเขียวเป็นศาสตร์ที่มุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาทางสิ่งแวดล้อมโดยยึดหลัก 12 ข้อ โดยเคมีพื้นฐานและเคมีประยุกต์แขนงต่างๆ ล้วนแล้วแต่เกี่ยวข้องกับเคมีสีเขียวซึ่งมุ่งเน้นพัฒนา วิจัยด้วยวัตถุประสงค์อันเป็นจุดมุ่งหมายเดียวกัน คือการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตและสังเคราะห์ โดยเป็นกระบวนการที่ปลอดภัยและทำให้เกิดมลภาวะน้อยที่สุด

เอกสารอ้างอิง

- [1] Anastas, P.T. and Warner, J.C. 1998. **Green Chemistry: Theory and Practice**. New York: Oxford University Press.
- [2] Alves, H.J. and et al. 2014. "Treatment of Clay with KF: New Solid Catalyst for Biodiesel Production". **Appl. Clay Sci.** 91-92: 98-104.
- [3] Hassan, H. and Hameed, B.H. 2011. "Fe-Clay as Effective Heterogeneous Fenton Catalyst for the Decolorization of Reactive Blue 4". **Chem. Engineer. J.** 171: 912-918.
- [4] Ausavasukhi, A. and Sooknoi, T. 2015. "Oxidation of Tetrahydrofuran to Butyrolactone Catalyzed by Iron-Containing Clay". **Green Chem.** 17: 435-441.
- [5] กนกพร โกชะโยธิน. 2544. การบำบัดโลหะหนักในน้ำเสียจากห้องปฏิบัติการวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยขานอ้อย. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต: มหาวิทยาลัยมหิดล.
- [6] อาทิตย์ อัสวสุชี และคณะ. 2557. "การดูดซับฟีนอลและสีย้อมจากสารละลายด้วยลิโนอาร์ไคต์และดินแดง". การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทยครั้งที่ 7 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ วิทยาเขต

- วังไกลกังวล ประจวบคีรีขันธ์ 12-14 พฤศจิกายน หน้า 416-421.
- [7] รัศมี สิทธิชนแก้ว และนวดล เหล่าศิริพจน์. 2554. “พัฒนาตัวดูดซับเพื่อบำบัดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากก๊าซธรรมชาติ”. **วารสารประชาคมวิจัย**. 97: 18-19.
- [8] Kunthadong, P. and et al. 2015. “Biodegradable Plasticized Blends of Poly(L-lactide) and Cellulose Acetate Butyrate: From Blend Preparation to Biodegradability in Real Composting Conditions”. **J. Polym. Environ.** 23(1): 107-113.
- [9] Sawaddee, P. and et al. 2014, “Compatibility Studies of Natural Rubber/Resistant Starch Type 4 Blends for Use as Biodegradable Materials”. **Pure and Applied Chemistry International Conference 2014**. Centara Hotel and Convention Centre, Khon Kaen, 8-10 January, p. 730-732.
- [10] Khongjangreed, P. and et al. 2014, “Preparation and Properties Testing of Environmentally Biodegradable Based on Starch for Agricultural Application”. **Macro 2014**, Chiang Mai, 6-11 July, p. 92-94.
- [11] Arthur, C.L. and Pawliszyn, J. 1990. “Solid Phase Microextraction with Thermal Desorption Using Fused Silica Optical Fibers”. **Anal. Chem.** 62: 2145-2148.
- [12] Sarafray-Yazdi, A. and Amiri, A. 2010. “Liquid-Phase Microextraction. **Trends Anal. Chem.** 29: 1-14.
- [13] Rezaee, M. and et al. 2006. “Determination of Organic Compounds in Water Using Dispersive Liquid-Liquid Microextraction”. **J. Chromatogr. A**. 1116: 1-9.
- [14] Soisungnoen, P., Burakham, R. and Srijaranai, S. 2012. “Determination of Organophosphorus Pesticides Using Dispersive Liquid-Liquid Microextraction Combined with Reversed Electrode Polarity Stacking Mode-Micellar Electrokinetic Chromatography”. **Talanta**. 98: 62-68.
- [15] Ordoñez, E.Y. and et al. 2015. “Determination of Artificial Sweeteners in Beverages with Green Mobile Phases and High Temperature Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry”. **Food Chem.** 169: 162-168.
- [16] Langlois, M.H. and et al. 2015. “Development of a Solvent-Free Analytical Method for Paracetamol Quantitative Determination in Blood Brain Barrier in vitro Model”. **J. Chromatogr. B**. 988: 20-24.
- [17] Pokhodenko, V.D. and Pavlishchuk, V.V. 2002. “Green Chemistry and Modern Technology”. **Theor. Exp. Chem.** 38(2): 69-87.
- [18] Matthews, M.A. 2001. “Green Electrochemistry. Examples and Challenges”. **Pure Appl. Chem.** 78(8): 1305-1321.
- [19] Intarakamhang, S. and Schulte, A. 2012. “Automated Electrochemical Free Radical Scavenger Screening in Dietary Samples”. **Anal. Chem.** 84(15): 6767-6774.
- [20] Abedinifar, S. and et al. 2009. “Ethanol Production by *Mucor indicus* and *Rhizopus oryzae* from Rice Straw by Separate Hydrolysis and Fermentation”. **Biomass Bioenerg.** 33: 828-833.
- [21] Shi, J. and et al. 2009. “Effect of Microbial Pretreatment on Enzymatic Hydrolysis and Fermentation of Cotton Stalks for Ethanol Production”. **Biomass Bioenerg.** 33: 88-96.

- [22] Royal Society of Chemistry (RSC). 2015. **Ibuprofen-a case study in green chemistry.** <http://www.rsc.org/education/teachers/learnnet/ibuprofen/ibuprofen.pdf>. 20 November.
- [23] American Chemical Society. 2015. **The BHC Company Synthesis of Ibuprofen. A Greener Synthesis of Ibuprofen which Creates Less Waste and Fewer Byproducts.** <http://www.epa.ohio.gov/portals/41/p2/ibuprofencasestudy.pdf>. 20 November.
- [24] Stashenko, E.E., Jaramillo, B.E. and Martínez, J.R. 2004. "Analysis of Volatile Secondary Metabolites from Colombian *Xylopia aromatica* (Lamarck) by Different Extraction and Headspace Methods and Gas Chromatography". **J. Chromatogr. A.** 1025: 105-113.
- [25] Grigonis, D. and et al. 2005. "Comparison of Different Extraction Techniques for Isolation of Antioxidants from Sweet Grass (*Hierochloë odorata*)". **J. Supercrit. Fluids.** 33: 223-233.